

氏 名	臧 孟 炎
生 年 月 日	
本 籍	中国
学 位 の 種 類	博士（工学）
学 位 記 番 号	博甲第243号
学位授与の日付	平成10年3月25日
学位授与の要件	課程博士（学位規則第4条第1項）
学位授与の題目	個別要素法による構造物の衝撃破壊挙動シミュレーションに関する研究
論 文 審 査 委 員	（主査）尾田 十八 （副査）杉田 忠彰, 茶谷 明義, 北川 正義, 梶谷 浩

学位論文要旨

This paper analyzes the impact fractures of a laminated glass with interlayered polyvinyl butyral (PVB) and a bi-layer laminated glass with PVB on one side, using the discrete element method (DEM). From the numerical results, it is shown following.

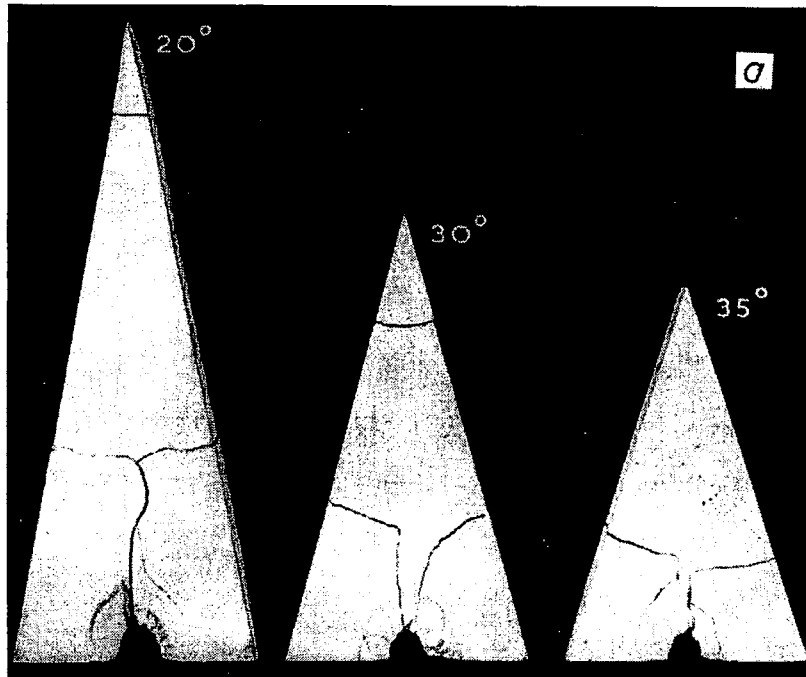
First, for only laminated type, it is obvious that the optimum adhesive strength between the **PVB** and the glass, is the lowest adhesive strength, such that there is no fracture in the adhesive layer when the beam is penetrated. By changing Young's modulus of **PVB** (hence changing the tensile strength), the optimum Young's modulus of **PVB** is a maximum in the region where the penetration energy is sensitive to the Young's modulus of **PVB**. Second, considering three types contained bi-layer type and reverse bi-layer type where the impact surfaces are the glass and PVB sheets. it is shown that the bi-layer type, laminated type and reverse bi-layer type have the maximal impact force in descending order. But penetration energies of laminated type and bi-layer type are similar. Based on the above observations, it can be concluded that the bi-layer laminated glass is safer than the laminated glass as the windscreen of automobiles.

Apart from above, DEM is applied to simulate the multiple fracture phenomena of triangular plaster of Paris plate that explosively loaded at the center of the base. Comparing with the corresponding experimental results, the fracture patterns are almost identical each other and it is obvious that multiple fracture phenomena can be forecasted by analyzing whole stress distribution of sample varying with time.

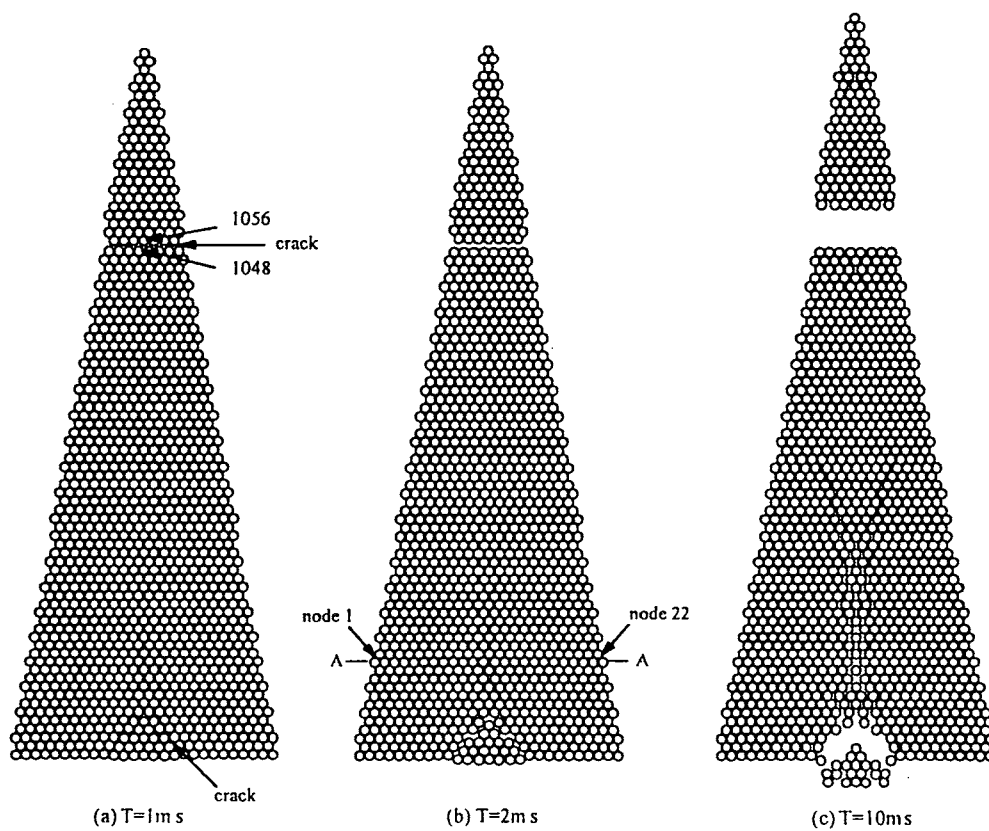
破壊現象は、空間的にも時間的にも広がりを持つ現象であり、その進展過程や破壊後の挙動が設計上も防災上も大きな意味を持つ。どこがどんな形で壊れるのか、壊れたものの影響はどこまで及ぶのか、さらにどうすれば破壊を防止できるのかなどが問題になる。破壊現象を数値解析する場合、用いる手法が、この広がりを持った破壊現象を的確に表現できるか否かが重要なポイントになる。

FEMは、微分方程式で表現される連続系を、有限の大きさを有する領域（有限要素）の集合体として離散系に理想化して解析するものである。固体力学・流体力学・熱力学など様々な分野で研究が行われ、多くの成果を上げてきた解析法である。ところで、FEMで用いる要素は、それぞれ隣り合った要素と辺と節点を共用し、連続しているために、基本的には互いに離れることができない。それに対して、Candallを先駆けとするDEM(Discrete Element Method)の場合、解析対象物の構成物体一つ一つを剛性要素として表現し、材料の持っている弾性及び非弾性性質を要素接点間に挿入した弾性ばねと粘性ダッシュポットで表す。すべての要素の並進及び回転に関する運動方程式を差分近似し、時間増分 Δt ごとに逐次計算を進める。要素間に作用する力が対応する強度を超えた時点で、この二つの要素間の破壊を認める。特に引張破壊では、要素間に作用する力をゼロにして、解析対象物がバラバラになるまで解析できる。

本研究ではまずDEMを用いた単一材料解析用のプログラムを作成し、解析方法の有効性の確認とぜい性材料の多重破壊メカニズムの解明のために図-1に示すようなAl-Hassaniらの頂角 20° の三角形石こう板爆発実験モデルの解析を試みた。爆発力を最大値 $P_{max}=5500\text{N}$ 、持続時間 $t_1=500\mu\text{s}$ の三角形パルスに設定し、 $\Delta t=0.042\mu\text{s}$ として、爆発荷重が作用してから10msまでの破壊挙動を図-2に示す。図-2(c)を図-1と比較したら、両者がよく一致していることが分かる。これで、用いた解析方法としてのDEMの有効性を確認できたとともに、解析結果から、ぜい性材料板の衝撃破壊はすべて引張応力破壊であることと、ぜい性材料板の多重



図－１ 底辺中央に No. 6 火薬を爆発させた三角形石こう板の破壊状況



図－２ DEM による三角形石こう板の爆発破壊挙動

破壊現象は破壊状況も考慮した時間的に変化する正確な試料全体の応力分布を求めることで明らかにすることができることがわかった。

次に、このプログラムを合わせガラスの破壊挙動の解析に拡張して、その貫通破壊挙動を解析するために、図-3に示すような両端固定合わせガラスばりの中央に、上から質量 $M=1\text{Kg}$ の剛性円柱衝撃子を $V=40\text{m/s}$ の速度で衝撃させたものを想定した。貫通までの破壊挙動は図-4に示す。図-4から合わせガラスが衝撃を受けた初期にはPVB両側のガラス板がそれぞれ独自挙動する。つまりまず上のガラスの下側から引張破壊による上へ向かうき裂が発生する。次に時間がたつにつれて、このガラス板はPVBを十分に圧縮することによって下のガラス板も曲げ変形して、その自由面側から引張破壊のき裂が発生するメカニズムが分かった。

PVBとガラス間の接着力、PVBのヤング率が合わせガラスの貫通破壊挙動へどのように影響するかを明らかにした。表-1はさきの図-3の解析モデルをもとに接着力強さを 10.9MPa からある程度まで変えて解析した結果である。表-2は中間膜の

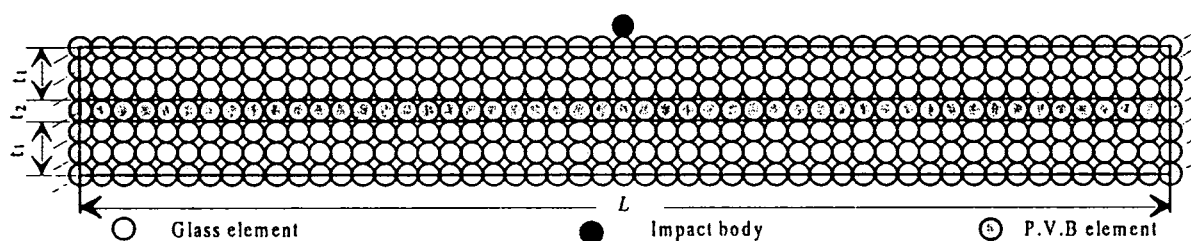
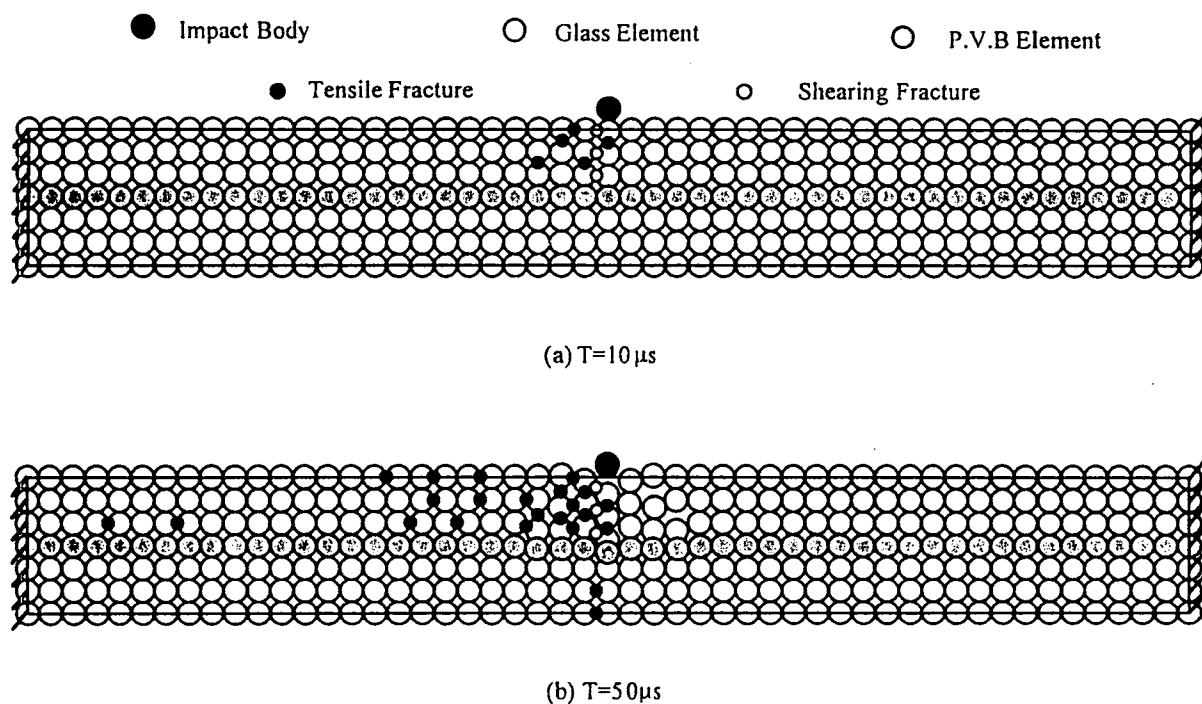


図-3 ラミネート型合わせガラスモデル



図－4 合わせガラスばりの衝撃破壊挙動

ヤング率 100MPa を 50% 増減し解析した結果である．表-1 と表-2 の解析結果よりガラス飛散量を押さえ、かつ貫通エネルギーを増大させるために、ガラスと PVB 間の接着強さは、その貫通まで PVB とガラスが分離しないような最小接着力であることと、PVB のヤング率が小さい領域で貫通エネルギーはそのヤング率の変化に敏感であり、しかしある程度大きくなると鈍くなるが、ガラス飛散量はその変化にほぼ比例して増大することから合理的な PVB のヤング率は、貫通エネルギーに対し敏感である区域のヤング率の最大値を採用すべきであることがわかった．

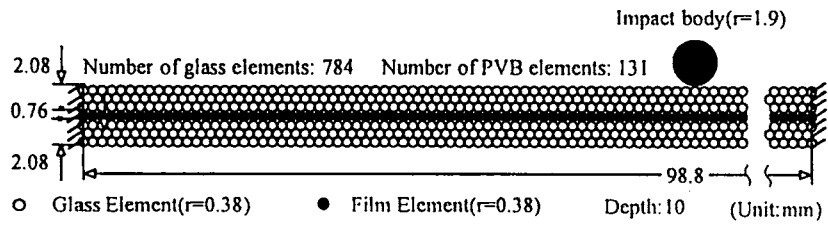
表－1 接着強さの変化による貫通エネルギーとガラス飛散量

	Adhesive strength(MPa)	Penetration energy(J)	Volume of glass broken (Numbers of element)
Beam1	10.9	28.5	100
Beam2	16.35	28.5	100
Beam3	7.35	39.5	206

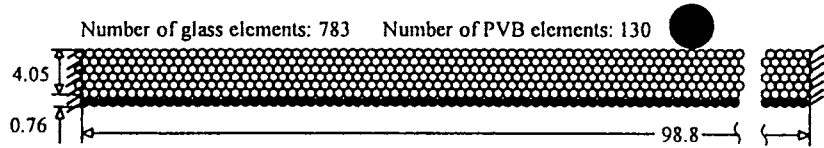
表-2 PVB のヤング率の変化による貫通エネルギーとガラス飛散量

	Young's Modulus(MPa)	Penetration energy(J)	Volume of glass broken (Numbers of element)
Beam1	100	28.5	100
Beam4	50	17.0	50
Beam5	150	28.9	156

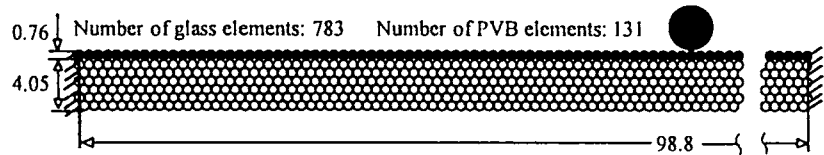
最後に乗員の安全性の観点からバイレーヤ型の合わせガラスが現在よく使われているラミネート型のものより有効であることを解明した。解析モデルは図-5に示すような $L=98.8\text{mm}$ の両端固定合わせガラスばり中央に質量 $M=2.27\text{kg}$ の剛性円柱衝撃子を $V=30\text{m/s}$ (約 100km/h) の速度で衝撃させたものを想定した。バイレーヤ型については、衝撃子がガラス面に当たる場合 (石等の飛来物が走行中の自動車フロントガラスにぶつかる場合を想定) をバイレーヤ型、一方衝撃子が膜面に当たる場合 (乗員がフロントガラスにぶつかることを想定) を逆バイレーヤ型とする。解析結果を表-3にまとめた。表-3から衝撃子が受ける最大衝撃力は、バイレーヤ型が一番大きく、逆バイレーヤ型が一番小さい。またラミネート型は逆バイレーヤ型より3倍弱大きい。この結果から、車の衝突事故時での乗員頭部のフロントガラスへの打ぼくによる力は、逆バイレーヤ合わせガラスのほうがラミネート型よりかなり軽減できることが予測される。次にガラス飛散量については、バイレーヤ型と逆バイレーヤ型はラミネート型より2倍ぐらい多い。しかし逆バイレーヤ型では膜が切れるまでガラス破片による乗員への加害は全くないことからこの優位性が評価できる。最後に貫通エネルギーはラミネート型とバイレーヤ型とではほとんどかわらない。よって以上のことを考えれば、より安全なフロントガラスはガラス面を車外に配置したバイレーヤ型合わせガラスではないかと思われる。



(a) Laminated type



(b) Bi-layer type



(c) Reverse bi-layer type

図-5 解析モデル

表-3 解析結果

TYPE	Penetration time(μ s)	Maximum impact force(N)	Penetration energy(J)	Volume of glass broken (Numbers of element)
Laminate	353	6714.0	2.39	136
Bi-layer	485	8993.0	2.27	263
Re-Bi-layer	613	2378.7	6.86	240

学位論文審査結果の要旨

各審査委員が提出論文の審査を行い、さらに平成10年2月4日の口頭発表後、その結果を踏まえて論文審査会を開催し、協議の結果次のとおり判定した。

本論文は、まず個別要素法の理論的定式化を行い、次にこの方法の有効性を三角形石こう板の爆発破壊モデルの解析を通して明らかにしている。またその結果から、ぜい性材料板の衝撃破壊はすべて引張応力破壊であること、したがってその多重破壊現象も時間的に変化する正確な試料全体の応力分布を求めることで可能となることを示している。

次に本手法を自動車フロントガラスとして利用されている合わせガラスの衝撃破壊挙動の解析へ応用している。特に中間膜とガラス間の接着力、中間膜のヤング率、ガラスの物性値などが合わせガラスの貫通破壊挙動へどのように影響するかを明らかにしている。具体的にはガラス飛散量を押さえ、かつ貫通エネルギーを増大させるために、ガラスと中間膜間の接着強さは、その貫通まで中間膜とガラスが分離しないような最小の接着力で良いこと。またガラスの物性値は合わせガラスとしての破壊挙動にあまり影響しないが、ただガラスを強くしすぎると、かえって貫通しやすくなることを明らかにしている。さらに通常のラミネート型合わせガラスとバイレーヤ型の合わせガラスの自動車フロントガラスとしての有効性も解析し、車外からの物体に対する耐破壊特性を向上させ、逆に内部乗員頭部のフロントガラス衝突による損傷を押さえるには、バイレーヤ型合わせガラスの方が有効であることを、衝撃力、貫通エネルギー、ガラス飛散量などの定量的値を通して明らかにしている。

以上の成果は、とくにぜい性材料構造物の強度設計法に大きく貢献するものであり、従って本論文は博士（工学）の学位に値するものと判定する。